



主流軸線上の速度分布による心機能評価

著者	中島 博行
号	7
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	医工博第45号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00097047

氏名（本籍地）	なかじま ひろゆき 中島 博行
学 位 の 種 類	博 士（医工学）
学 位 記 番 号	医工博 第 4 5 号
学位授与年月日	平成 2 8 年 3 月 2 5 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科、専 攻	東北大学大学院医工学研究科（博士課程）医工学専攻
学位論文題目	主流軸線上の速度分布による心機能評価
論文審査委員	（主査）東北大学教 授 西條 芳文 東北大学教 授 早瀬 敏幸 東北大学教 授 石川 拓司

論 文 内 容 の 要 旨

第 1 章 背景

心臓の主な機能は、体循環系と肺循環系の 2 系統の血液循環を維持させる機械的なポンプ機能である。この機能を発揮するための心臓壁の収縮と伸展は、効率よく血液を駆出・流入させるために局所心筋の不均一な伸縮による壁の変形が生じていると考えられてきている。したがって、この壁の変形特性を知ることは、心筋機能のみならずポンプ効率を知る上でも極めて重要な意義をもつ。この特性を評価する方法はあるが、壁の描出精度等の問題が残されており未だ普及が進んでいない状況である。そのため、十分な心機能評価が行われていない。

第 2 章 目的

本研究では、左室内血流動態と左室壁動態との関連を追及し、血流動態から新たな心機能評価法を開発することを目的とした。具体的には、超音波法のカラードブラ法を使用して心室内血流の流軸線の 3 次元分布を求める流軸線分布図法を用いて、左室内血流の主流軸線を精度よく決定するための「主流軸線上速度分布測定法」を開発してこの実用性を検証し、主流軸線上での速度分布から心筋機能とポンプ機能の関連性を追及する。さらに、開発した方法による壁の変形特性を推定する機能評価法としての臨床的意義の解明と有用性および実用性を図る。

第 3 章 左室腔内血流動態解析のための主流軸線上速度分布測定法の開発

左室壁動態解析のための「主流軸線上速度分布測定法」を開発するにあたり、心臓腔内血流（3 次元流）の 2 次元平面に、3 次元流を考慮した流軸線分布を表示する「流軸線分布図法」を考案した。流軸線は以下のようにして求めた。カラードブラ法で得られる面上速度分布から 3 次元流を考慮した面上流速ベクトル分布を求める Echo-Dynamography を用いて、面上流速ベクトル分布から速度の絶対値分布を求め、走査支点から種々の距離における走査線上での最大速度値を示す位置を極大点として導出する。この極大点を示す位置を走査面上に展開すると、流速ベクトルの強度分布の稜線が描か

れ、この稜線が流軸線となる。この表示法が「流軸線分布図法」である。流軸線の中で、特に流れの中心を表す流軸線を主流軸線と定義した。

心臓は局所心筋の不均一な伸縮による壁の変形が生じているため、心室内流軸線は湾曲することになると考えられる。そこで本研究では流軸線分布図法を用い、精度よく血流の特徴抽出ができるように主流を表す流軸線の変曲点を含めプロットし、プロット点間を線で結びこれを主流軸線とし、さらにこの主流軸線上の速度データを抽出して定性・定量解析ができるようにした「主流軸線上速度分布測定法」を考案して臨床的実用性を目指した。この方法を臨床で適用する場合の血流情報を取得する断面は、検出するドプラ速度情報の誤差が最小かつ血流の中心を捉えることができる断面（大動脈弁輪中央、僧帽弁輪中央および心尖部を含む断面）を選定する。

第4章 主流軸線上速度分布測定法の検証

流軸線分布図法で左室内流軸線がほぼ直線状に描かれた臨床例と、明らかに湾曲して描かれた臨床例を対象として、第3章の主流軸線上速度分布測定法と主流軸線を直線状に近似して測定した方法を用いて軸上速度分布を求めた。主流軸線が直線状に描かれた臨床例についてはどちらの方法でも問題はなかったが、湾曲した臨床例では、直線状に近似して測定した方法では速度分布が正確に示されなかった。

以上から、本研究で開発した方法は、主流軸線を精度よく決定することができ、臨床的実用性が高いと考えられた。

第5章 左室壁動態の解析法

心室壁動態は3次元的に生ずるため、断層像を用いて少なくとも長軸断面とこれと直交する短軸断面上で計測する方法を選定した。

左室壁動態取得の断面は、超音波ビーム方向が左室壁と直交するように走査支点を選び、走査面上には大動脈弁輪中央、僧帽弁輪中央および心尖部を含む断面で、左室構造がこの面で対称になる断面である。

左室短軸方向の壁動態評価は、左室の心尖から心基部弁輪部までを心尖部、中央部、心基部に3区分し、それぞれ左室内径と壁厚を計測した。左室長軸方向の壁動態評価は、僧帽弁後尖弁輪の移動距離と移動方向を用いた。

第6章 健常例群における駆出期の左室腔内血流動態と左室壁動態との関連

左室内主流軸線上速度分布と左室壁動態の関連を調べるために、健常例群10例の駆出期について、第3章と第5章の方法を用いて解析した。

全例で左室内主流軸線分布、主流軸線上速度分布、壁動態は同様の結果を示した。主流軸線は心尖部から心基部まで示され、駆出初期（ES）は心室中隔壁寄り、中期（MS）から末期（LS）は左室中央に見られた。主流軸線上速度分布は心尖部から心基部に向かって上昇し、心基部ではESで急勾配を示しLSにかけて緩やかな勾配に変化した。中央部から心尖部の速度勾配はほぼ同様であり、心基部より小さく、MSでやや上昇しLSでは減少した。壁動態から見た左室長軸内腔形状は、ESで心基部が心尖部より広い半紡錘形状からMSで心基部が広い漏斗形状、LSでは円筒形状に変化し、内径変化は心基部で大きく心尖部で小さいものであった。心室中隔壁と左室後壁の壁厚は、心基部と中央部、ESとMSの心尖部で増加したが、心尖部のLSは減少した。

主流軸線上速度分布から推定される内腔形状とその変化は、壁動態の解析結果と一致しており、速度曲線から内腔形状とその変化の推定が可能であると考えられた。また、心基部の速度曲線は、ES では心基部に見られる渦流エネルギーによる流量増加分、MS では僧帽弁輪の下降と左室後壁の内腔への張り出し変形による容量増加分を表現し、心尖部の速度曲線の変化は、ES から MS は心尖部での圧力上昇、LS は圧力上昇の抑制を表現していると推測された。これらから心基部は流量調整、心尖部は圧力調整の役割を担っていることが推測された。

第7章 健常例群における流入期の左室腔内血流動態と左室壁動態との関連

第6章と同様に、同一の対象および手技によって流入期について検討した。

全例でほぼ同様の結果を示した。主流軸線は心基部から心尖部まで左室中央に示された。主流軸線上速度分布は、急速流入期（RF）では僧帽弁輪から心基部の最大速度点まで直線状に上昇し、心尖部までは直線状に減少して心尖で速度がほぼ0となった。緩徐流入期（SF）の速度値はRFや心房収縮期（AC）より遅く示された。ACは僧帽弁輪から心基部の最大速度点まで急激に上昇し減少、中央部では再び緩やかに上昇し、心尖部では減少して心尖で速度がほぼ0となった。壁動態から見た左室長軸内腔形状は、等容拡張期で円筒状形状、RFで心基部が心尖部より広い半紡錘形状に変化し、ACまでほぼ同様の形状であった。心室中隔壁と左室後壁の壁厚は、心基部と中央部、心尖部のRFとSFで減少したが、心尖部のACは増加した。

駆出期同様、速度曲線から内腔形状とその変化の推定が可能であると考えられた。また、心基部から左室中央の速度曲線は、RFでは僧帽弁輪の上昇と左室後壁の張り出し変形からの回復による容量増加分、ACでは心房収縮による増加分と心尖部収縮による心基部拡大の増加分を表現し、心尖部の速度曲線の変化は、RFからSFでは圧力低下を示し、ACでは圧力上昇傾向を表現していると推測された。心基部は流量調整、心尖部は圧力調整の役割を担っていることが推測された。

第8章 病的症例における駆出期および流入期の左室腔内血流動態と左室壁動態の解析

心機能が低下した前壁中隔心筋梗塞例1例を解析して健常例群と比較した。

主流軸線は、駆出期・流入期ともに健常例群より短く示され、駆出期には患側、流入期には健側へ変位し、主流軸線上速度分布は、健常例群とは明らかに異なった速度分布を示した。駆出期では各時相とも1つの値の速度勾配でほぼ同様の値であり、流入期の心基部では健常例群と比べ速度分布が異なる範囲が狭く、また1心周期を通して心尖まで速度分布が示されなかった。これは、心基部の速度分布は、駆出期ではESの心基部の渦流エネルギーとMSの後壁の張り出し変形による容量増加分、さらに流入期では後壁の張り出し変形からの回復による容量増加分が少ないことを表現していると考えられる。このことは、壁動態から心筋梗塞部位の存在によって容量増加が障害された結果に起因している推測される。よって、心基部では流量調整機能が低下し、心尖付近では速度が示されないことから心尖部の圧力機能が損なわれていると推測された。

第9章 考察

左室腔内は通常は閉鎖空間とみなすことができ、流路に存在する血液は非圧縮性流体と考えて良いので、左室腔内血流にはエネルギー保存則等が成り立つと考えてよい。それゆえ、本研究で考案した主流軸線分布、主流軸線上速度分布およびそのエンベロープ曲線上に表示された情報には、心臓の構造と機能を構成する種々の物理的性質に関する情報が含まれていると考えられる。したがって、これ

を読み取ることで以下のようなポンプ機能に関する情報を容易に取得、評価できると考えられた。臨床例の解析結果から、

- (1) 主流軸線の面上分布は、壁動態による影響を鋭敏に反映しており、その形状と変化から壁の変形状況を知ることができ、変形機能の評価が可能と考えられた。
- (2) 主流軸線上速度分布のエンベロープ曲線の形状から左室内腔形状および流路の内径を推定できると考えられた。
- (3) 主流軸線上速度分布のエンベロープ曲線と速度 0 線とで囲まれる面積は、その瞬時点における左室内腔の容量分布を示していると考えられる。従って、主流軸線と直交する短軸面で裁断することによって左室の局所容量を評価でき、流量の増減機能を推定できると考えられた。

第 10 章 結論

本研究で考案した「主流軸線上速度分布測定法」は実用性が高く、この方法によって得られた主流軸線上速度分布パターンは、心臓腔内の圧分布状況、流量分布状況を表現し、3 次元情報を含んだ壁の変形特性、心筋の伸縮特性によって生じた結果を示していると考えられた。以上から、主流軸線上速度分布から局所心筋機能・ポンプ機能を直観的に判断できる可能性があり、臨床の現場で用いられている従来の方法にはない心機能の新しい評価法に成り得ると判断された。

主流軸線上速度分布は、心室の局所心筋の伸縮機能と密接な関連のある情報を含んでおり、その詳細な解析は心筋機能の非観血的評価に重要な役割を演じると考えられた。

論文審査結果の要旨

心臓の主な機能は、血液循環を維持させる機械的なポンプ機能であり、効率よく血液を駆出・流入させるための心臓壁の収縮と伸展は、局所心筋の不均一な伸縮による壁の変形から生じると考えられている。近年、心臓壁の変形を評価する方法が提案されているが、描出精度等の問題が残されており、十分な機能評価は行われていない。本論文は、血流動態と壁動態との関連を追究し、血流動態から新たな心機能評価法を開発するための研究成果をまとめたものであり、全編 10 章からなる。

第 1 章は本研究の背景を述べている。

第 2 章は本研究の目的を述べている。

第 3 章では、超音波ドプラ法に基づく Echo-Dynamography により、3 次元流を考慮した 2 次元断面における血流の中心を主流軸線として求め、その線上での速度分布から血流動態を解析する主流軸線上速度分布測定法について述べている。

第 4 章では、第 3 章で開発した方法が、流入・流出血流分布が直線的でない形状を示す場合にも主流軸線を精度よく設定でき、速度情報を正確に捉えることができることを示し、臨床における高い実用性を述べている。

第 5 章では、血流動態と壁動態の関連を解析するために用いた壁動態解析法について述べている。左室内膜面および僧帽弁輪の位置を精細に計測し心臓の壁動態の特徴を捉えている。

第 6 章では、健常例群の駆出期において、左室壁動態との関連から左室内主流軸線上速度分布曲線の臨床的意義を検討し、心基部は流量調整、心尖部は圧力調整の役割を担っていることを推測している。

第 7 章では、健常例群の流入期において、左室壁動態との関連から左室内主流軸線上速度分布曲線の臨床的意義を検討し、駆出期同様、心基部は流量調整、心尖部は圧力調整の役割を担っていることを推測している。

第 8 章では、心筋梗塞例の病的症例を解析して健常例群と比較検討している。主流軸線上速度分布は健常例とは明らかに異なり、機能評価が可能であることを示している。

第 9 章は考察である。

第 10 章は結論である。

以上要するに本論文は、血流動態の情報を利用し、その詳細な解析によって非観血的な心機能評価が可能であることを示したものであり、医工学及び医学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（医工学）の学位論文として合格と認める。